

**Б.Д. Белан, Г.Н. Толмачев**

## **ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ АЭРОЗОЛЯ НАД ЗАПАДНОЙ СИБИРЬЮ В ТРОПОСФЕРЕ**

Проведено исследование временной изменчивости интегральной или средней концентрации аэрозоля в слое 0–5 км над Западной Сибирью. Показано, что годовой ход концентрации имеет асимметричный характер, который обусловлен приростом фотохимической компоненты в весеннее время. Обнаружен многолетний тренд концентрации аэрозоля в этом слое.

В развитии многих атмосферных процессов важную роль играет аэрозоль – это процессы облакообразования ослабления солнечного излучения, поступающего к поверхности Земли, генерация первичных и вторичных примесей воздуха, выступающих в большинстве случаев в качестве его загрязнителей, и т.д. Вклад же самого аэрозоля в ход атмосферных процессов во многом определяется его концентрацией в нижней тропосфере, где сосредоточена основная масса взвешенных веществ.

Накопленные в ИОА СО РАН данные о пространственном распределении аэрозоля, полученные в ходе многолетнего самолетного зондирования атмосферы [1], позволяют частично восполнить этот пробел. Целью настоящей работы является обобщение этого материала для выявления временной (долгопериодной) изменчивости содержания аэрозоля в нижней и средней тропосфере. Под долгопериодной изменчивостью здесь понимаются вариации концентрации аэрозоля, начиная от среднемесячных. Аппаратура и методики, которые использовались в ходе измерений, описаны в [2–5].

Отметим, что индивидуальные и даже среднемесячные вертикальные профили концентрации очень сильно изменяются в зависимости от погодных ситуаций, времени суток, сезона года и т.п. [6]. Эти изменения могут выражаться в наклоне кривой профилей вертикального распределения, уменьшении или увеличении концентрации в целом или в отдельных слоях, что существенно затрудняет сопоставимость и интерпретацию данных. Поэтому целесообразно перейти к осредненным или интегральным распределениям во всем слое.

В данных исследованиях выбран регион Западной Сибири, так как для него имеется наибольший объем результатов измерений. При этом из обработки полностью исключены вертикальные профили, попадавшие в «шапки» городов, т.е. в основном анализируются данные, полученные в фоновых условиях.

Для рассмотрения годового хода концентрации аэрозоля было рассчитано интегральное содержание числа частиц в вертикальном столбе воздуха единичного сечения:

$$\hat{N} = \int_0^H N(h) dh, \quad (1)$$

где  $N(h)$  – счетная концентрация аэрозоля на высоте  $h$ . Величина  $H$  принята равной 5 км, что соответствует максимальной высоте полета самолета-лаборатории Ил-14. Средний многолетний (1981–1988 гг.) годовой ход аэрозоля, рассчитанный по (1) для территории Западной Сибири, приведен на рис. 1. Для его построения использовано около 3000 профилей счетной концентрации.

Из этого рисунка видно, что средний многолетний годовой ход интегрального содержания аэрозоля в вертикальном столбе воздуха имеет асимметричный вид с четко выраженным максимумом в мае и широким минимумом с августа по январь. Такой временной ход счетной

концентрации аэрозоля очень сильно напоминает годовой ход общего содержания озона [7] и его приземной концентрации, измеренной в этом же регионе [8]. Озон же, как известно, имеет исключительно фотохимическую природу, что может свидетельствовать об аналогичности механизмов их образования, т.е. причиной увеличения концентрации аэрозоля в тропосфере Западной Сибири также является усиление фотохимических процессов в весеннее время. В пользу такого предположения говорит и известный афоризм Г.В. Розенберга «аэрозоль – это процесс» [9], заключающийся в том, что частички аэрозоля образуются непосредственно в атмосфере из аэрозолеобразующих газов. Основным механизмом образования и роста этих частиц является гетерогенная конденсация паров аэрозолеобразующих соединений, к которой присоединяется химический захват примесных газов-предшественников [10].

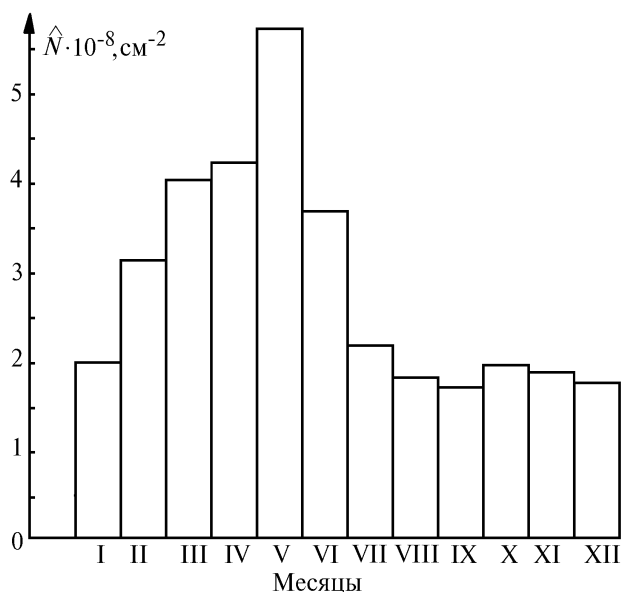


Рис. 1. Средний многолетний годовой ход концентрации аэрозоля в вертикальном столбе воздуха (0–5 км) сечением 1 см<sup>2</sup> над Западной Сибирью

Исходя из изложенного, можно полагать, что само географическое положение Западной Сибири обуславливает (усиливает) выявленный годовой ход  $\hat{N}$ . С одной стороны, ее территория в значительной степени покрыта лесными массивами, которые в весеннее время генерируют большое количество терпенов и изопренов [11], являющихся материалом для построения аэрозольных частиц [12]. Это, как известно, часто приводит к образованию естественного фотохимического природного смога [13]. С другой стороны, на эту территорию приносится (или образуется непосредственно на ней) большое количество продуктов антропогенной деятельности, о чем сообщалось в [5], что способствует росту частиц аэрозоля путем захвата примесных газов. Суперпозиция двух таких механизмов в условиях повышенной влажности, характерной для региона [11], и дает отмеченный эффект.

Согласно [14] 35–85% всей массы природного аэрозоля составляет водорастворимая фракция, включающая преимущественно ионы  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ , которые играют основную роль в процессе роста и трансформации частиц. Тогда правомочность всех вышеизложенных обоснований должна проявляться и в годовом ходе химического состава аэрозоля.

В качестве проверки этого вывода приведем рис. 2, на котором представлен средний многолетний химический состав аэрозоля для мая и декабря (максимум и минимум концентрации в годовом ходе даны на рис. 1).

Для его построения использовано 165 проб аэрозоля в мае и 167 – в декабре, взятых в диапазоне высот 0,5 – 5 км в период с 1983 по 1987 г.

Из рис. 2 видно, что майское увеличение концентрации аэрозоля происходит в основном за счет его водорастворимой фракции. Содержание ионов  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  в составе частиц увеличивается от декабря к маю в 2–4 раза. Минеральная компонента аэрозоля, которая образуется, как правило, диспергированием [15], наоборот, имеет более высокую концен-

трацию в декабре. Это относится к таким элементам, как Ca, Al, Si, Mn, Cu. Таким образом, из данных рис. 2 следует, что фотохимическая генерация частиц в атмосфере в декабре существенно меньше, чем в мае. Это обусловлено резким снижением в холодный период поступления в нижнюю атмосферу паров аэрозолеобразующих соединений из-за прекращения деятельности растений, уменьшения испарения паров с подстилающей поверхности, покрытой снегом.

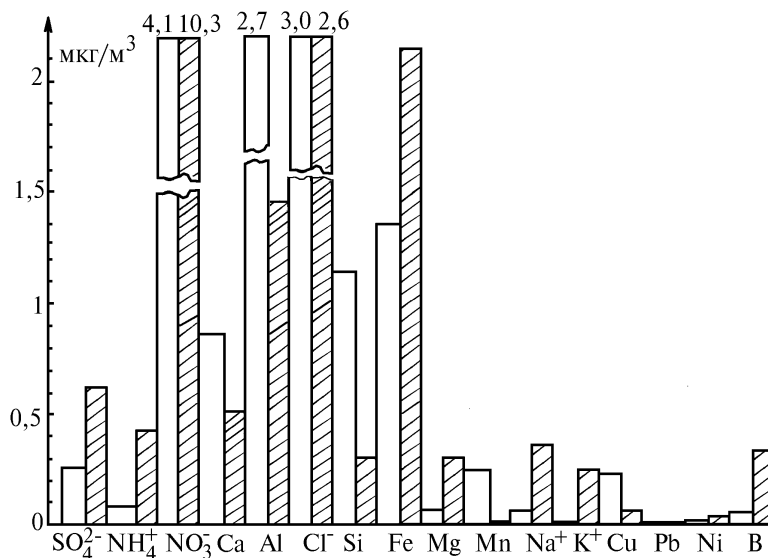


Рис. 2. Средний многолетний химический состав аэрозоля над Западной Сибирью в мае (заштрихованные области) и декабре (светлые)

Отсутствие подобных данных по годовому ходу концентрации аэрозоля для других регионов не позволяет провести соответствующее сопоставление. Тем не менее можно предполагать, что приведенные данные будут интересны специалистам, занимающимся исследованием климатообразующих процессов.

Продолжительный период зондирования атмосферы с помощью самолетов-лабораторий позволяет также оценить межгодовую изменчивость концентрации аэрозоля.

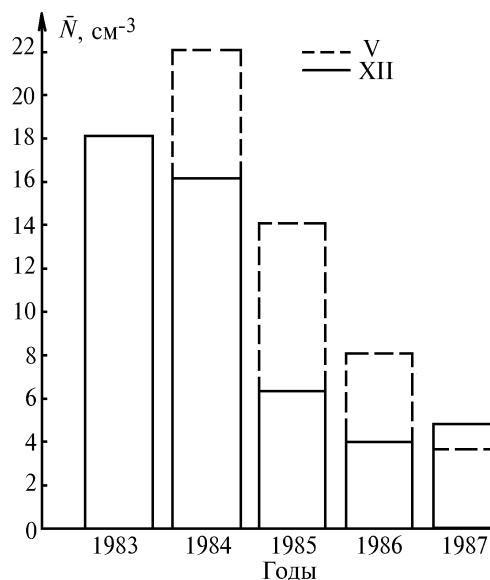


Рис. 3. Средняя многолетняя счетная концентрация аэрозоля в слое 0–3 км в мае (штриховая) и декабре (сплошная линия)

Для этого обратимся вначале к рис. 3, на котором показана динамика средней в слое 0–3 км счетной концентрации аэрозоля в мае и декабре, рассчитанная по формуле

$$\bar{N} = \frac{1}{H} \int_0^H N(h) dh. \quad (2)$$

Май и декабрь выбраны в силу указанных выше причин, а также из-за того, что для этих месяцев имелась хорошая выборка.

Из рис. 3 видно, что в период с 1983 по 1987 г. наблюдается четкая тенденция к уменьшению счетной концентрации аэрозоля над Западной Сибирью, причем уменьшение имеет кратное значение: в декабре в 4,5, в мае – 5,5 раза.

На фоне усиливающего антропогенного загрязнения атмосферы, хотя зондирование и проводилось вне промышленных центров, такой результат выглядит весьма неожиданным. Поэтому обратимся к другим данным. Поскольку многолетнего регулярного вертикального зондирования аэрозоля на территории бывшего СССР не проводилось, оценку придется производить по приземным измерениям, выполняемым на сети мониторинга загрязнений воздуха.

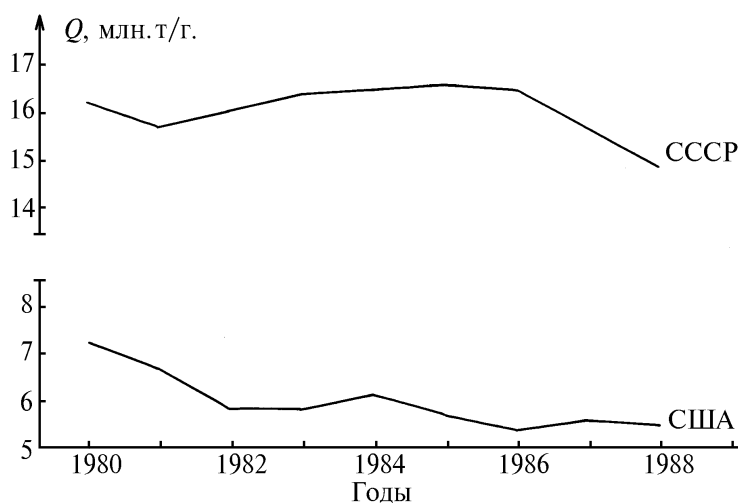


Рис. 4. Суммарные выбросы взвешенных веществ в СССР и США

На рис. 4 и 5 по данным, опубликованным в [16], построены графики изменения суммарных выбросов взвешенных веществ на территории бывшего СССР и США и изменение концентрации аэрозоля в некоторых городах.

Из рис. 4 видно, что за период с 1983 по 1988 г. объем выбросов на территории СССР уменьшился на 9%, в США – на 4%. Учитывая, что вклад этих двух государств составляет значимую часть от всех мировых выбросов и обнаруженное на рис. 3 уменьшение концентрации имеет кратный характер, можно полагать, что данные рис. 4 полностью исключают версию об антропогенной природе выявленного тренда.

Вместе с тем данные рис. 5 показывают, что в некоторых городах бывшего СССР имеется тенденция к уменьшению концентрации аэрозоля. Это в определенном смысле подтверждают данные, приведенные на рис. 3. Тенденция убывания концентрации взвешенных веществ в воздухе зарубежных городов: Калькутты, Афин, Мадрида, Милана – обнаружена за десятилетний период с 1975 по 1985 г. также и в [17].

Сопоставление приведенных результатов позволяет сделать следующий вывод. Отмеченное на рис. 3 убывание концентрации аэрозоля имеет явно не антропогенное происхождение, так как объем выбросов в мире почти не уменьшается [16]. В то же время в ряде мест земного шара отмечается многолетняя тенденция снижения концентрации аэрозоля в приземном слое воздуха.

Если учесть, что концентрация аэрозоля в городском воздухе складывается из фоновой и создаваемой рассеиванием местных выбросов, то можно полагать, что в данном случае существенно уменьшается фоновая компонента, обусловленная естественными природными процессами. Следовательно, полученный нами результат имеет закономерный характер, отражающий многолетнюю динамику существования атмосферного аэрозоля.

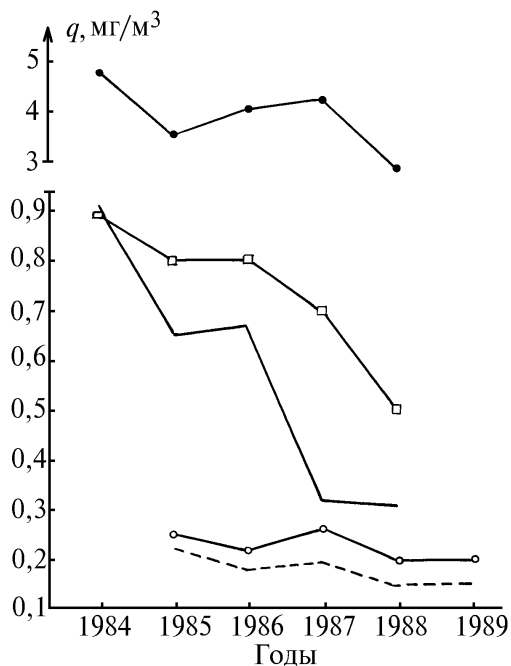


Рис. 5. Концентрация взвешенных веществ по [16]: ---- - Караганда; ——— - Новосибирск; ●—● - Омск; □—□ - Калининград; ○—○ - Тольятти

С целью расширения рассматриваемого периода перейдем от многолетних среднемесячных концентраций к среднегодовым. Соответствующие среднегодовые счетные концентрации аэрозоля в слое 0–3 км, рассчитанные по формуле (2), показаны на рис. 6.

Из рис. 6 видно, что так же, как и среднемесячные для мая и декабря (см. рис. 3), среднегодовые счетные концентрации аэрозоля уменьшаются с 1983 по 1988 г. Можно отметить некоторое увеличение концентрации аэрозоля в 1989 г. В 1991 г. наблюдался явный рост до значений, близких тем, которые зафиксированы в 1983 г. Таким образом, на протяжении 9 лет наблюдений, в период с 1983 по 1991 г., над Западной Сибирью наблюдалось волнообразное изменение концентрации аэрозоля в нижней атмосфере.

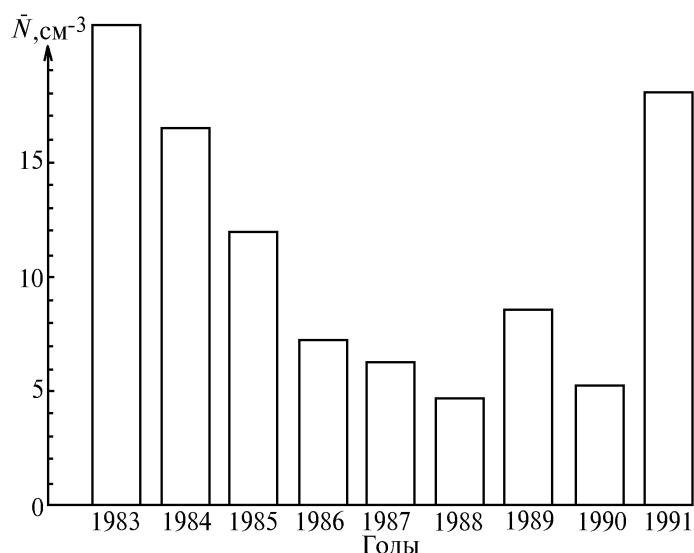


Рис. 6. Средняя годовая счетная концентрация аэрозоля в слое 0–3 км над Западной Сибирью

В теории климата известен ряд колебаний метеовеличин с периодами, превышающими 1 год [18, 19], – это 26-месячный, 11-летний, 22-летний циклы и т.д. По своей форме межгодо-

вой ход, изображенный на рис. 6, ближе всего соответствует кривой, характеризующей многолетнюю цикличность метеопараметров, имеющую 11-летний период [20]. Поэтому можно предполагать, что в данном случае зафиксирована значительная часть 11-летнего цикла естественной природной изменчивости атмосферного аэрозоля.

Анализ изменчивости химического состава аэрозоля за рассматриваемый период, пробы которого отбирались синхронно с измерением счетной концентрации, показал, что в его составе уменьшалось в основном содержание минеральной фракции, особенно сильно таких элементов, как Al, Ca, Fe. Концентрация же ионов  $\text{SO}_4^{2-}$  почти не изменилась. Компоненты водорастворимой фракции, обычно относимые к аэрозолю морского происхождения [21], включающие ионы  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ , даже увеличили свой вклад в составе частиц. Последнее, на наш взгляд, указывает на то, что многолетние вариации концентрации аэрозоля сопровождались и изменением режима циркуляции воздуха над регионом. В частности, увеличение концентрации ионов  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  можно связать с увеличением повторяемости прихода морских воздушных масс на территорию Западной Сибири, что еще раз указывает на возможную связь вариаций аэрозоля с 11-летним циклом атмосферных процессов. (Известно, что циркуляционные механизмы также подвержены влиянию этого цикла [22, 23]).

Подводя итог работы в целом, отметим основные результаты. Исследование годового хода концентрации аэрозоля в нижней атмосфере выявило его асимметричный характер, обусловленный приростом массы аэрозоля от зимы к весне, первопричиной которого являются выбросы аэрозолеобразующих веществ природными (лесными) экосистемами. Межгодовые вариации концентрации аэрозоля, обнаруживающие продолжительные тенденции к убыванию и росту, связаны с динамикой минеральной компоненты и, скорее всего, отражают имеющиеся в атмосфере природные циклы.

1. Белан Б. Д., Лукьянов О. Ю., Микушев М. К. и др. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. N 10. С. 1081–1087.
2. Белан Б. Д. // Аппаратура дистанционного зондирования параметров атмосферы. Томск: ТФ СО АН СССР, 1987. С. 34–40.
3. Ковалевский В. К., Толмачев Г. Н. // Там же. С. 53–69.
4. Зуев В. Е., Белан Б. Д., Кабанов Д. М. и др. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. N 10. С. 1012–1021.
5. Белан Б. Д. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. N 3. С. 205–222.
6. Белан Б. Д., Гришин А. И., Матвиенко Г. Г., Самохвалов И. В. Пространственная изменчивость характеристик атмосферного аэрозоля. Новосибирск: Наука, 1989. 152 с.
7. Перов С. П., Хргиан А. Х. Современные проблемы атмосферного озона. Л.: Гидрометеоздат, 1980. 288 с.
8. Белан Б. Д., Колесников Л. А., Лукьянов О. Ю. и др. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. N 6. С. 635–638.
9. Горчаков Г. И., Исаков А. А., Георгиевский Ю. С. и др. // Оптика атмосферы и аэрозоль. М.: Наука, 1986. С. 5–19.
10. Емиленко А. С. // Там же. С. 19–29.
11. Шварева Ю. Н. Климат Западно-Сибирской равнины в погодах. М.: Наука, 1976. 116 с.
12. Розенберг Г. В., Любовцева Ю. С., Горчаков Г. И. // Изв. АН СССР. ФАО. 1982. Т. 18. N 8. С. 822–839.
13. Ровинский Ф. Я., Егоров В. И. Озон, окислы азота и серы в нижней атмосфере. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 183 с.
14. Шопаускас К. К., Шопаускане Д. А., Галвонайте А. В. и др. // Оптика атмосферы и аэрозоль. М.: Наука, 1986. С. 205–219.
15. Фукс Н. А. Механика аэрозолей. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 351 с.
16. Безуглая Э. Ю., Расторгуева Г. П., Смирнова И. В. Чем дышит промышленный город. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 256 с.
17. Андрюков В. П., Пудовкина И. Б. // Метеорология и гидрология. 1992. N 7. С. 116–120.
18. Монин А. С., Шишков Ю. А. История климата. Л.: Гидрометеоздат, 1979. 408 с.
19. Бudyко М. И. Климат в прошлом и будущем. Л.: Гидрометеоздат, 1980. 354 с.
20. Солнечная и солнечно-земная физика / Под ред. А. Бруцека и Ш. Дюрана. М.: Мир, 1980. 254 с.
21. Ивлев Л. С. Химический состав и структура атмосферных аэрозолей. Л.: Изд-во ЛГУ, 1982. 368 с.
22. Дружинин И. П., Сазонов Б. И., Ягодинский В. Н. Космос–Земля. Прогнозы. М.: Мысль, 1974. 288 с.
23. Багров Н. А., Кондратович К. В., Педь Д. А., Угрюмова А. И. Долгосрочные метеорологические прогнозы. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 248 с.

**B. D. Belan, G. N. Tolmachev. Temporal Variability of Aerosol in the Troposphere over Western Siberia.**

Temporal variability of intergral and mean concentration of aerosol within 0–5 km layer over Western Siberia is investigated. The annual variability of the concentration is shown to be asymmetrical due to increase of photochemical component in spring time. Long-standing trend of the aerosol concentration within this layer is found.